

# 水平定向钻进技术在浅层低渗透性含水层 地下水开采中的试验研究

李炳平, 叶成明, 李小杰, 解 伟, 郑继天

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

**摘 要:**浅层低渗透性含水层埋深浅、渗透性低,难以用常规管井开采。利用水平定向钻井技术,可在含水层内长距离铺设过滤器,从而增大水井出水量。研制的贴砾过滤器,其性能经水平井试验验证满足水平井成井要求,取得了良好的试验效果。

**关键词:**水平定向钻进;地下水开采;水平井;贴砾过滤器;铺管;抽水试验

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)10-0065-05

**Research on Horizontal Directional Drilling Technology Used in Shallow Low Permeable Aquifer Groundwater Extraction/LI Bing-ping, YE Cheng-ming, LI Xiao-jie, XIE Wei, ZHENG Ji-tian (Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding Hebei 071051, China)**

**Abstract:** Horizontal water well is effective for shallow low permeable aquifer groundwater extraction. The construction procedures include well drilling, bore hole reaming, well forming, gravel packing and well development. The technical issue of horizontal directional drilling technology is discussed in the paper, pre-packed well screen was developed and proper drilling method for horizontal well construction was proposed. It provides a new way for shallow low permeable aquifer groundwater extraction.

**Key words:** horizontal directional drilling; groundwater extraction; horizontal well; gravel-lined filter; pipe installation; pumping test

## 1 研究背景

随着工农业生产的飞速发展,对地下水资源的需求越来越大,供需矛盾日益突出。如何合理开发利用有限的地下水资源是我们面临的重大挑战。在地下水资源开发利用中,浅层地下水资源的供水作用和意义未得到足够重视。由于浅层含水层埋深浅、层位薄、渗透性低,难以用常规管井开采。以往开采浅层地下水,多以大口井、集水辐射井等方法成井。但这些方法施工难度大、成本高,且开采效果不理想。非开挖铺管技术为开采浅层低渗透性地下水资源提供了较理想的工艺方法和条件。水平井是将过滤器以水平或近似水平安装在含水层中,可垂直于含水层流向长距离铺设,能获得较大的水井出水量,以解决该地层取水难的问题。本文介绍了借助非开挖铺管技术,实施水平井开采浅层地下水资源的研究成果。

## 2 水平井定向钻进技术与成井工艺

水平定向钻进技术是利用水平定向钻机,通过导向仪制导按预先设定的钻孔轨迹钻进成孔,再铺设地下管线的新技术。水平井包括水平双面井和水平盲井两种钻进技术与成井工艺。通常成井深度较浅时采用双面井结构,回拖扩孔和铺管;当钻孔较深或场地受限时采用盲井结构,以顶进扩孔和铺管。当成井深度 < 15 m 时宜采用无线式导向系统;成井深度  $\geq 15$  m 时采用有线式导向系统。

### 2.1 水平井定向钻进

#### 2.1.1 施工准备

(1) 场地勘察:首先进行现场踏勘、地表测量和水文勘察,掌握施工场地的地形和铺管的轴向地面海拔高度或相对高度、地层岩性、施工场地条件等。

(2) 钻孔轨迹设计:水平双面井钻孔轨迹由“第一造斜段、水平直线段和第二造斜段”共 3 段组成,

收稿日期:2010-09-10

基金项目:国土资源部“十一五”第一批重大科技创新项目“华北平原地下水安全与可持续利用”中第五课题——《浅层低渗透性含水层水平井开采技术研究与示范》项目(工作项目编号:1212010734411)

作者简介:李炳平(1958-),男(汉族),河北人,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心高级工程师,钻探工程专业,从事水文地质钻探研究和开发工作,河北省保定市七一中路 1305 号。

见图1。其中第二造斜段是井管进入水平孔段的关键过渡段;第一造斜段是井壁管出露地表的关键过渡段。盲井钻孔轨迹设计至水平孔段的终点即可。

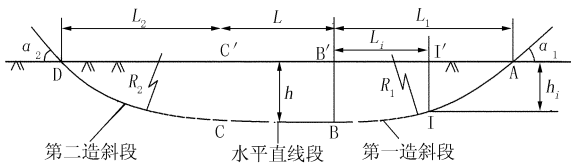


图1 水平井钻孔轨迹示意图

(3) 钻孔轨迹基本参数确定: ① 钻孔的入土角、出土角: 由井管材质、铺管长度和成井深度确定; ② 水平孔段由过滤器铺设长度确定; ③ 成井深度由场地的水文地质条件(含水层埋深)确定; ④ 第一、第二造斜段曲率半径  $R$  由钻杆最小曲率半径  $R_d$  确定:

$$R_d = 1200d \quad (1)$$

式中:  $d$ ——钻杆直径, mm。

一般取  $R \geq R_d$ 。

### 2.1.2 导向孔钻进

(1) 双面井钻进: 首先按预先设计的地下铺管轨迹钻导向孔(图2), 钻头由入土点进入, 经地下穿越到另一端钻出。导向孔钻进的基本原理是依靠导向系统测量并控制掌面钻头的方位角实现直线或造斜钻进。造斜钻进时依靠钻机顶进力使钻头受来自周围地层的反作用力(钻头掌面法向力)使钻孔的方向改变, 实现造斜钻进; 回转钻具时钻头掌面在旋转中的方向不断改变, 使其受到均等的周向力, 钻头沿其轴向钻进。

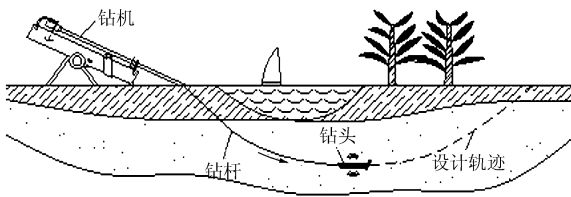


图2 双面井导向孔施工示意图

(2) 盲井钻进: 钻具以一定倾角从钻孔的设计入口钻至设计深度后, 变为水平钻进, 当水平段达到设计深度后终孔(图3)。

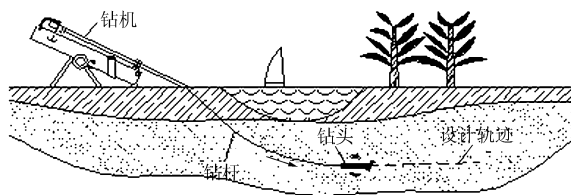


图3 盲井导向孔施工示意图

### 2.1.3 扩孔

(1) 孔径确定: 利用小口径钻头快速制导完成导向孔后, 为保证铺管安全、减少井管安装阻力, 应对导向孔进行扩孔。钻孔与井管间的间隙是关系到井管安装成功与否的关键, 终孔直径过大会增加施工难度和扩孔工作量; 间隙过小则会增加井管安装的阻力不利于铺管。一般扩孔直径按下式计算:

$$D = K_1 D_0 \quad (2)$$

式中:  $D$ ——适合井管安装的钻孔直径, mm;  $D_0$ ——井管外径, mm;  $K_1$ ——经验系数, 一般取  $K_1 = 1.3 \sim 1.6$ , 当地层均质完整时取小值, 水平井以砂层为主, 取大值。

(2) 双面井扩孔: 导向孔完成后, 在钻孔出口处卸下导向钻头, 换上扩钻头、单动器及回拉钻杆进行扩孔(图4), 当扩至与钻机同一侧工作场地时, 即完成了第一级扩孔。卸下反扩钻头及分动器, 并把机上钻杆再次与后续钻杆连接, 在钻孔出口端换上大一级的扩孔钻头, 根据需要进行多级扩孔, 直至扩到设计孔径。

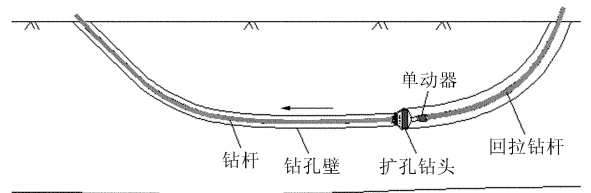


图4 扩孔示意图

(3) 盲井扩孔: 导向孔完成后, 拉出钻具, 采用顶进扩孔。顶进扩孔是通过钻杆施加给扩孔钻头轴向推力和扭矩的扩孔工艺, 与水平定向钻进回拖扩孔不同点是为保证钻孔按原导向孔钻进, 需要在扩孔钻头前端装一个导向头, 为确保钻孔轨迹不发生大的变化, 可在钻头后端加上导向仪, 随时监测钻孔轨迹的变化。

## 2.2 井管安装

### 2.2.1 双面井井管安装

水平双面井以回拖铺管, 铺管前应将井管按顺序连成整体, 为保证过滤器不被擦坏, 需要在过滤器前后加接保护箍, 要求保护箍外径比过滤器外径大 15 mm 以上。扩孔工作完成后, 在钻孔出口侧将回拉钻杆依次与扩孔钻头、单动器、拉管头及井管连接。然后逐根回拉钻杆将井管拖入孔内, 当井管到达钻机一侧的地表时, 铺管工作完成。

回拖阻力计算: 将钻孔分为 3 段  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  (对应的是井壁管、过滤器、井壁管)(图5)。井管在孔内的受力情况比较复杂, 现假设在理想状况下, 钻孔通

道的拐点是圆滑过渡,井管本身的柔韧性及其与孔壁的间隙足以满足井管穿过,回拖井管时的受力状态可通过 4 个点位分析计算。

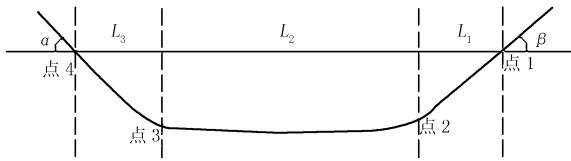


图 5 井管在孔内的示意图

(1) 井管入孔前产生的回拖力

$$P_1 = [w_1(L_1 + L_3) + w_2L_2]f_1 + F_0 \quad (3)$$

式中: $P_1$ ——最小铺管启动力(未考虑泥浆的剪切力),N; $w_1$ ——每米井壁管重力,N/m; $w_2$ ——每米过滤器重力,N/m; $F_0$ ——全部孔内钻具摩擦阻力,N,铺管前试拉钻具获取; $f_1$ ——井管与地面摩擦系数,一般取 0.15~0.2。

(2) 井管进入孔底时(位置 2、管内无泥浆)产生的回拖力

$$P_2 = (W_1L_3 + W_2L_2)f_1 + F_1 + (G_1 - W_1)L_1(f_2 \cos\beta + \sin\beta) + W_{\text{钻}}L_3(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha) + sh\rho \quad (4)$$

式中: $F_1$ ——水平孔段钻具摩擦阻力,按占  $P_0$  比例取值,N/m; $G_1$ ——每米井壁管排开泥浆的重力,N/m; $f_2$ ——孔壁摩擦系数,一般取 0.3; $\beta$ ——钻孔出土角; $W_{\text{钻}}$ ——每米钻杆重力,N/m; $\alpha$ ——钻孔入土角; $sh\rho$ ——排出的泥浆重力( $s$  为井管面积; $h$  为成井深度; $\rho$  为泥浆重度)。

(3) 过滤器全部进入孔内(第 3 点位置、管内充满泥浆)时的回拖力

$$P_3 = W_1L_3f_1 + (W_1 - G_2)L_1f_2 + (W_2 - G_3)L_2(f_2 \cos\beta - \sin\beta) + W_{\text{钻}}L_3(f_2 \cos\alpha + \sin\alpha) + sh\rho \quad (5)$$

式中: $G_2$ ——每米井管(不含管内体积)排开泥浆的重力,N/m; $G_3$ ——每米过滤器(不含管内体积)排开泥浆的重力,N/m。

(4) 井管接近地表时的回拖力  $P_4$

假设钻孔出土角和入土角度相近, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  孔段产生的铺管摩擦阻力为:

$$P_4 = [(W_2 - G_3)L_2 + (W_1 - G_2)L_1 \cos\alpha + (W_3 - G_2)L_3 \cos\beta]f \quad (6)$$

分析表明,井管安装阻力主要与铺管长度与深度、钻具和井管的质量与体积、及其与地表和孔壁的摩擦系数、泥浆的密度及钻孔的入土角、出土角等有关。铺管前应验算各孔段的回拖阻力是否满足井管

的力学性能要求。

### 2.2.2 水平盲井井管安装

盲井成井与水平双面井不同,水平盲井钻孔只有一个入口,只能采用顶入法铺管(图 6)。铺管时可在井管前端装设悬浮管导引井管进入孔内,若过滤器铺设距离较长时应在过滤器间间隔安装双壁环空悬浮管,以降低井管对孔壁的摩擦阻力,保证铺管成功。

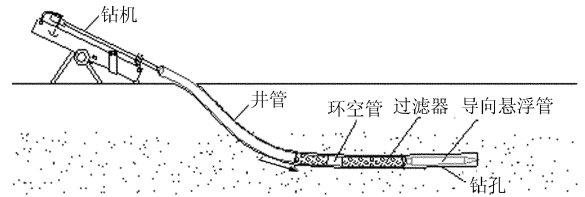


图 6 盲井井管安装示意图

### 3 过滤器制作与性能

水平成井不同于垂直成井,井管以回拉或顶进的方式在孔内近似水平的状态下安装,管外无法填砾,只能采用携砾过滤器。目前,国内已有的携砾过滤器,仅石英砂贴砾过滤器在成井时不用围填砾料,但由于其整体密度大,在水平井中使用受到限制。

#### 3.1 贴砾过滤器制作

贴砾过滤器以 PVC-U 塑料滤管为衬管、以规则塑料颗粒或陶粒作滤料,以人工的方法采用无毒粘合剂将一定粒径的滤料与过滤衬管在常温下固化而成(图 7、图 8)。该过滤器有如下优点:(1)密度低,与石英砂贴砾管相比,低 40% 以上;(2)贴砾层强度高,柔性好;(3)孔隙率高,渗透性好;(4)耐腐蚀,水井使用寿命长。



图 7 陶粒贴砾过滤器

#### 3.2 贴砾过滤器的性能

贴砾过滤器的贴砾层性能与适用范围见表 1、表 2。



图8 全塑贴砾过滤器

表1 贴砾层渗透性能

含水层 类型	砾料规格 /mm	孔隙率/%			渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
		石英砂	塑料颗粒	陶粒	石英砂	塑料颗粒	陶粒
粉细砂	0.5~1.5	28	30	31	0.5	$\geq 0.8$	1.5
细砂	1.5~2.5	26	28	29	0.3	$\geq 0.5$	1.0
中砂	2~4	25	27	28	0.1	$\geq 0.3$	0.7
粗砂	3~5	23	25	26	0.05	$\geq 0.1$	0.5

表2 滤料粒径规格

含水层岩层	粉细砂	细砂	中砂	中粗砂
粒径范围/mm	0.05~0.1	0.1~0.25	0.1~0.5	0.25~2
适宜的滤料粒径/mm	0.5~1	1~2	2~4	3~5

## 4 水平井生产试验

2009年8月22日~9月4日,由中国地质科学院勘探技术研究所配合,应用全塑贴砾过滤器在河北廊坊施工了一眼水平双面试验井。地层岩性自地表依次为杂填土、粉土、粉质粘土和中粗砂及粉质粘土等,其中,中粗砂层段为6.5~10.2 m,厚度3.7 m,地下水位1.97 m。为了便于对比,同时另施工了一眼垂直井,见图9。

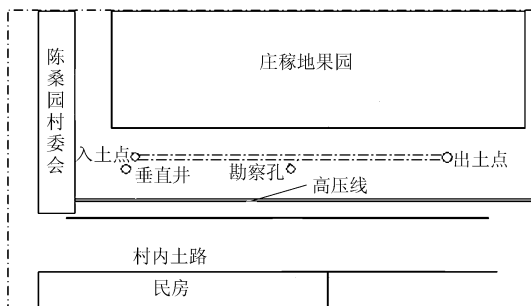


图9 试验现场平面布置图

双面试验井钻孔轨迹设计参数为:钻孔总长145 m,水平跨距143 m,垂直深度8.6 m,入土角、出土角均为 $12^\circ$ ,见图10。采用PVC-U井壁管(外径200 mm)和全塑贴砾过滤器(外径250 mm)成井,过滤器安装长度26 m。全塑贴砾过滤器性能参数为:

孔隙率33.26%,渗透系数0.11  $\text{cm/s}$ ;井管安装总长度94 m。井身结构见图11。

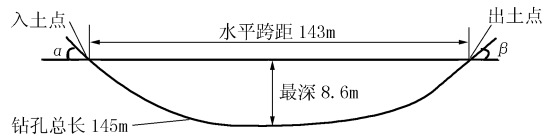


图10 水平试验井钻孔轨迹

岩土名称	分层厚度 /m
杂填土	1.60
粉土	4.20
粉质粘土	0.70
细砂	0.60
中砂	3.10
粉质粘土	1.00

钻孔直径: 500mm; 井壁管直径: 200mm; 滤水管直径: 250mm;  
井壁管长: 68mm; 全塑贴砾过滤器: 26m

图11 水平试验井结构设计

## 4.1 水平双面试验井施工

### 4.1.1 导向孔施工

采用GBS-35型铺管钻机,导向孔钻进采用前端带 $15^\circ$ 斜掌面的 $\text{O}180$  mm导向钻头配合DIGI-TRAK ECLIPSE SST型地磁导向定位系统完成施工。泥浆粘度控制在30~40 s。导向孔施工用时6 h 40 min,平均时效达21.6 m/h。

### 4.1.2 扩孔

采用 $\text{O}300$  mm、 $\text{O}400$  mm、 $\text{O}500$  mm挤压式扩孔钻头分3级回拉扩孔(图12),分别用时1 h 25 min、4 h 30 min、2 h 10 min;平均时效101.65 m/h、32 m/h、66.46 m/h。



图12 扩孔钻头

## 4.2 水平试验井成井

### 4.2.1 井管安装

(1)下管准备:为防止孔内出现异常或塌孔,保证井管安装成功,扩孔前预先将井管在钻孔出口侧连接好,且过滤器两端加接保护箍。

(2)井管安装:扩孔工作结束后,立即将钻杆依次与扩孔钻头、单动器、拉管头、井管连接好。逐根

回拉钻杆将井管拉入孔内,总铺管用时 1 h 50 min;铺管过程中钻机回拉拉力平稳,平均表压 6 MPa,最大表压 7 MPa。

(3)洗井:井管安装结束后,在井内下入  $\varnothing 15$  mm 钢制镀锌管作风管,用英格索兰 VHP400 型空压机对过滤器逐段进行喷射洗井。洗井用时 12 h 即达到水清沙尽。

(4)抽水试验:采用 HYL50-125 型离心泵抽水,WS-1040 型水位计观测水位。离心泵泵管和水位计探测头由  $\varnothing 15$  mm 镀锌管送至井底,累计稳定抽水时间 8 h,测得水井单位出水量为  $1.91 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ ,是同直径垂直井水量的 1.72 倍。

## 5 结语

通过水平定向钻进技术在浅层低渗透性含水层地下水开采中的试验研究,我们认为:

(1)应用水平定向钻进技术开采浅层低渗透性含水层地下水资源是可行的,为我国有限的地下水资源开采提供了一种新的技术手段。该技术方法改变了我国传统的建井技术模式。

(2)通过水平井钻井技术和成井工艺的研究,解决了水平井成井难、无法围填砾料的技术问题。特别是将非开挖铺管技术应用到了开采浅层地下水资源的技术领域,对我国今后开采浅层地下水资源和实施地下污染物的治理具有技术指导意义。

(3)应用水平井技术可在同一含水层内垂直含水层流向长距离铺设过滤器,可增大水井出水量。

(4)为解决浅层地下水的取水难题,还应增加水平成井深度和过滤器铺设长度的试验研究,同时向不同方向辐射成井和垂向多排列成井,以获得更大的水井出水量,扩大成果应用范围,使得水平定向钻进技术为我国开采浅层地下水和污染治理发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] 乌效鸣. 导向钻进与非开挖铺管技术[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [2] 李山,朱文鉴. 水平定向钻进管线铺设工程技术规范[Z]. 北京:中国非开挖技术协会,2002.
- [3] 李炳平,等. 陶粒贴砾过滤器的研制与应用[J]. 探矿工程(钻掘钻掘工程),2009,(36)8.

# "第十四届全国水利水电钻探暨岩土工程施工学术交流会在成都召开"

**本刊讯** 由中国水力发电工程学会地质及勘探专业委员会、中国水利学会勘测专业委员会、水利水电钻探信息网联合主办的"第十四届全国水利水电钻探暨岩土工程施工学术交流会",于2010年10月20~22日在美丽的四川成都青城山召开。会议由中国水电顾问集团成都水利水电建设有限责任公司承办。

来自全国水利水电系统的勘测设计单位及有关厂商等50多个单位的100余名代表参加了本次会议。本次会议特邀了知名钻探专家赵尔信做了专题报告。大会共收到论文50余篇,涉及水利水电钻探、岩土工程施工技术等多个方面。共有19位专家和代表在大会上做了报告和交流,有关大学和研究单位在会上所作的相关理论和研究对实际工作具有重大的指导意义。本次大会会有2位国际友人参加了学术交流。

本次会议是我国水利水电钻探暨岩土工程界的一次盛会,是对2年多来水利水电行业钻探技术与岩土工程施工技术发展的交流与总结。本次会议达到了交流技术、增进了解、沟通信息、共同发展的目的。

职小前副院长代表中国水电顾问集团成都勘测设计研

究院,张杰董事长代表成都水利水电建设有限责任公司致欢迎辞;中水东北勘测设计研究有限责任公司工程勘察院院长孙志峰代表全国水利水电钻探信息网致欢迎辞;中国水电顾问集团李良辉处长代表水电水利规划设计总院到会讲话。

随着水利水电事业的发展,各水利水电勘测单位及时顺应国家形势发展要求,利用自身优势,积极进军新的市场,取得了良好的社会效益和经济效益,同时推动了钻探工程、岩土工程和相关技术的发展。为了鼓励广大工程技术人员参加学术活动,活跃学术气氛,大会成立了专家组,对收到的论文进行了评选,从中评选出优秀论文。

会议决定由水利水电钻探信息网组织专家编写《水利水电工程钻探手册》。

随着市场经济的发展,水利水电钻探在拥有空前的发展机遇的同时,也面临着巨大的挑战。招标投标制度的完善、国际承包商的加入使之竞争更加激烈。全行业应该团结起来,加强交流和合作,相互学习和借鉴,不断提高市场竞争能力和技术含量,以灵活的市场运作、过硬的技术和质量、良好的信誉和服务参与到市场竞争中去。